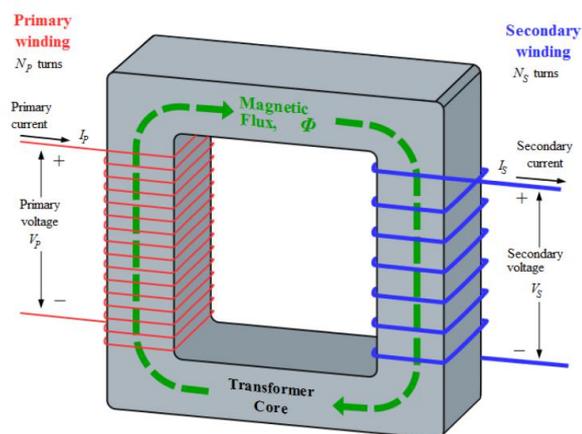


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

Transformator merupakan peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan secara induksi elektromagnetik mentransformasikan daya listrik (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama menurut IEC 60076-1 tahun 2011. Transformator menggunakan prinsip hukum induksi *Faraday* dan hukum *Lorentz* dalam menyalurkan daya, di mana arus bolak balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet. Dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial.¹⁰



Gambar 2.1 Elektromagnetik Trafo

(Sumber : Buku Pedoman Trafo Tenaga PT. PLN (Persero), hal 1)

Dalam operasi penyaluran tenaga listrik transformator dapat dikatakan jantung dari sistem transmisi dan distribusi. Dalam kondisi ini suatu transformator diharapkan dapat beroperasi secara maksimal. Oleh karena itu transformator harus dipelihara dengan menggunakan sistem dan peralatan yang benar, baik, dan tepat.

¹⁰ Sigi Syah Wibowo, *Analisa Sistem Tenaga : Analisa Sistem Tenaga*, Malang, UPT Percetakan dan Penerbitan Polinema 2018, hal 29.

2.1.1 Prinsip Kerja Transformator⁹

Transformator memiliki bagian utama yaitu inti, dua set atau lebih kumparan dan isolator. Inti transformator terbuat dari lembaran baja silikon yang satu dengan lainnya diisolasi dengan pernis dan kumparan terbuat dari material tembaga. Kumparan yang dihubungkan ke sumber energi disebut kumparan primer, sedangkan kumparan yang dihubungkan ke beban disebut kumparan sekunder. Material isolasi trafo tersusun dari kombinasi material dielektrik cair dengan dielektrik padat.

Jika kumparan primer dihubungkan ke sumber tegangan bolak-balik, sementara kumparan sekunder dalam keadaan tidak dibebani, maka di kumparan primer mengalir arus yang disebut dengan arus beban nol (I_0). Arus ini akan membangkitkan fluks bolak-balik pada inti. Fluks bolak-balik ini dilingkupi oleh kumparan primer dan kumparan sekunder, sehingga pada kedua kumparan timbul gaya gerak listrik (ggl).

Jika kumparan sekunder dibebani, maka pada kumparan tersebut mengalir arus sekunder (I_2). Arus sekunder akan menimbulkan fluks pada inti trafo yang berlawanan dengan fluks arus I_0 . Untuk mengimbangnya, maka arus di kumparan primer harus bertambah menjadi I_1 , hingga dipenuhi :

$$N_1 I_0 = N_1 I_1 - N_2 I_2 \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

N_1 = jumlah belitan kumparan primer

N_2 = jumlah belitan kumparan sekunder

I_0 = arus beban nol

I_1 = arus di kumparan primer

I_2 = arus di kumparan sekunder

2.1.2 Jenis - jenis Transformator

Dalam sistem kelistrikan, transformator memiliki beberapa jenis yang digunakan untuk keperluan yang berbeda antara lain :

⁹ Bonggas L. Tobing, *Peralatan Tegangan Tinggi Edisi Ketiga*, Jakarta, Penerbit Erlangga, 2019, hal 229.

a. Berdasarkan Level Tegangan

1. Trafo *Step Up*

Trafo jenis ini merupakan trafo yang berfungsi untuk menaikkan besaran atau level tegangan AC dari rendah ke besaran yang lebih tinggi. Dalam hal ini nilai tegangan sekunder yang merupakan *output* lebih tinggi dengan cara memperbanyak jumlah lilitan di kumparan sekunder. Trafo *step up* biasa digunakan pada sistem pembangkit listrik.

2. Trafo *Step Down*

Trafo *Step Down* adalah trafo yang digunakan untuk menurunkan besaran tegangan AC dari besaran yang tinggi ke besaran yang lebih rendah. Pada Trafo *step down* ini, rasio jumlah lilitan pada kumparan primer lebih banyak jika dibandingkan dengan jumlah lilitan pada kumparan sekundernya. Trafo jenis ini digunakan pada sistem transmisi 150 kV ke sistem distribusi 20 kV dan kemudian diturunkan lagi ke besaran tegangan yang sesuai untuk kebutuhan rumah tangga dan industri.

b. Berdasarkan Penggunaannya

1. Transformator Daya

Transformator daya adalah jenis trafo yang digunakan untuk meyalurkan daya dari sistem pembangkitan ke sistem transmisi yang bertegangan tinggi serta untuk menyalurkan daya dari sistem transmisi ke sistem distribusi.

2. Transformator Distribusi

Transformator distribusi digunakan untuk mendistribusikan energi listrik dari pembangkit listrik ke daerah perumahan ataupun lokasi industri. Pada dasarnya, trafo distribusi ini mendistribusikan energi listrik pada tegangan menengah 20 kV dan 220 V hingga 380 V untuk keperluan industri dan rumah tangga.

3. Transformator Ukur

Transformator ukur digunakan untuk mengukur kuantitas tegangan, arus listrik dan daya yang biasanya diklasifikasikan menjadi trafo tegangan dan trafo arus.

2.1.3 Transformator Daya

Secara umum transformator daya merupakan peralatan/komponen listrik pada gardu induk yang berfungsi untuk mentransformasikan daya listrik berupa arus dan tegangan dengan mempertahankan nilai frekuensi (tetap).



Gambar 2.2 Transformator Daya

Berdasarkan tegangan operasinya, transformator daya dapat dibedakan menjadi transformator 500/150 kV dan 150/70 kV yang biasa disebut *Interbus Transformer* (IBT) serta transformator 150/20 kV dan 70/20 kV yang disebut transformator distribusi. Titik netral transformator ditanahkan sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengamanan / proteksi, sebagai contoh

transformator 150/70 kV ditanahkan secara langsung di sisi netral 150 kV dan transformator 70/20 kV ditanahkan dengan tahanan rendah atau tahanan tinggi atau langsung di sisi netral 20 kV nya.¹¹

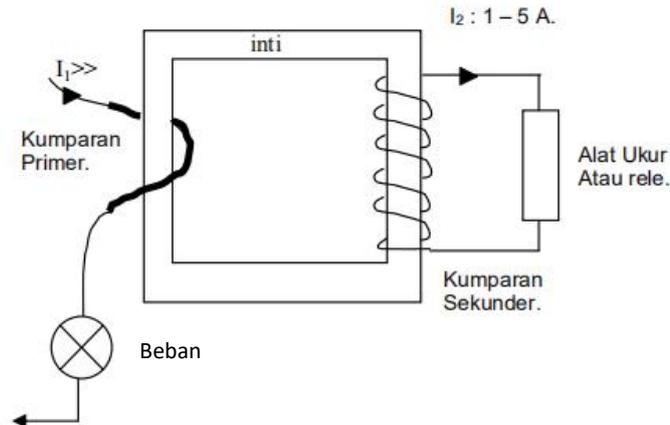
2.1.4 Transformator Arus

Transformator arus biasa disebut trafo arus atau *current transformer* (CT) adalah suatu peralatan listrik yang digunakan untuk mentransformasikan besaran arus dari tinggi ke rendah umumnya 1-5 A pada jaringan tegangan tinggi. Alasan lain digunakannya trafo arus adalah karena dalam melakukan pengukuran tidak dapat dilakukan secara langsung menggunakan alat ukur ampere meter karena isolasi pada ampere meter tidak dirancang untuk tegangan tinggi. Selain untuk pengukuran arus, trafo arus juga dibutuhkan untuk pengukuran daya, pengukuran energi, telemeter dan rele proteksi.

Bagian utama trafo arus adalah kumparan primer, kumparan sekunder, dan inti yang terbuat dari baja silikon. Prinsip kerja trafo arus sama dengan prinsip kerja trafo daya satu fasa. Kumparan primer trafo arus dihubungkan seri dengan jaringan atau peralatan yang akan diukur nilai arusnya, sehingga pada kumparan primer (I_1) sama besarnya dengan arus pada jaringan. Arus I_1 akan membangkitkan gaya gerak magnet (ggm) pada kumparan primer sebesar $N_1 I_1$. Ggm ini memproduksi fluks pada inti. Selanjutnya, fluks ini membangkitkan gaya gerak listrik pada kumparan sekunder (E_2). Jika terminal kumparan sekunder dihubungkan dengan *metering* atau rele proteksi, maka akan mengalir arus I_2 pada kumparan sekunder tersebut. Arus ini akan membangkitkan ggm pada kumparan sekunder sebesar $N_2 I_2$.⁹

¹¹ Mukhammad Rif'at Za'im, *Analisis Transformator Daya 3 Fasa 150 kV/20 kV pada Gardu Induk Ungaran PLN Distribusi Semarang*, Semarang, Edu Elekrika Journal, 2014, hal 10.

⁹ Bonggas L. Tobing, op.cit, hal 111.



Gambar 2.3 Prinsip Kerja Trafo Arus

(Sumber : PT. PLN (Persero), *Peralatan Gardu Induk*, hal 13)

Fungsi trafo arus antara lain adalah :

- Mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem metering dan proteksi.
- Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, sebagai pengamanan terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran.
- Standarisasi besaran sekunder, untuk arus nominal 1 - 5 A.

2.2 Sistem Proteksi

Sistem proteksi merupakan sekumpulan peralatan proteksi secara lengkap yang terdiri dari peralatan utama dan peralatan-peralatan lain yang dibutuhkan untuk melakukan fungsi tertentu berdasarkan prinsip-prinsip proteksi sesuai dengan definisi yang terdapat pada standar IEC 6255-20. Sistem proteksi sangat penting dalam penyaluran tenaga listrik baik distribusi maupun transmisi. Suatu sistem tenaga listrik dapat dikatakan aman dan boleh beroperasi apabila dipasang seperangkat alat yang berfungsi untuk mengamankan sistem jika terjadi gangguan.

Sistem proteksi tenaga listrik umumnya dipasang untuk mengidentifikasi kondisi sistem tenaga listrik dan bekerja berdasarkan informasi yang diperoleh oleh sistem tersebut seperti arus, tegangan, frekuensi, dan lain-lain. Informasi

yang diperoleh dari sistem tenaga listrik digunakan sebagai perbandingan untuk menentukan besarnya. Apabila besaran yang diterima melebihi batas *setting* pada sistem proteksi, maka sistem proteksi akan bekerja untuk mengamankan sistem tenaga listrik tersebut.

Sistem proteksi dapat dikelompokkan menjadi 2 (dua) guna menghindari dari kegagalan proteksi, yaitu :

1. Pengaman Utama, pengaman utama ini yang bertanggung jawab untuk menghilangkan gangguan yang terjadi secepat mungkin dan diharapkan bekerja tanpa waktu tunda.
2. Pengaman Cadangan yang umumnya mempunyai waktu tunda hal ini untuk memberikan kesempatan kepada pengaman utama bekerja terlebih dahulu, dan jika pengaman utama gagal, barulah pengaman cadangan bekerja.

2.2.1 Fungsi Sistem Proteksi

Untuk mendapatkan kategori laik untuk operasi, suatu sistem tenaga listrik memerlukan sistem proteksi yang andal agar apabila terjadi gangguan pada jaringan listrik dapat ditangani dengan baik. Selain itu, berikut adalah beberapa fungsi sistem proteksi :

1. Mengurangi bahkan menghindari kerusakan peralatan akibat gangguan. Semakin cepat reaksi perangkat proteksi yang digunakan maka akan semakin sedikit pengaruh gangguan kepada kemungkinan kerusakan alat.
2. Cepat melokalisir luas daerah yang mengalami gangguan menjadi sekecil mungkin.
3. Dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi kepada konsumen dan menjaga kontinuitas penyaluran tenaga listrik.
4. Mengamankan manusia terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh listrik.

2.2.2 Zona Proteksi

Untuk mengatasi luasnya daerah sistem tenaga listrik yang harus diamankan saat terjadi gangguan sehingga sistem proteksi dirancang secara selektif berdasarkan daerah dan zona proteksi. Idealnya sistem proteksi harus

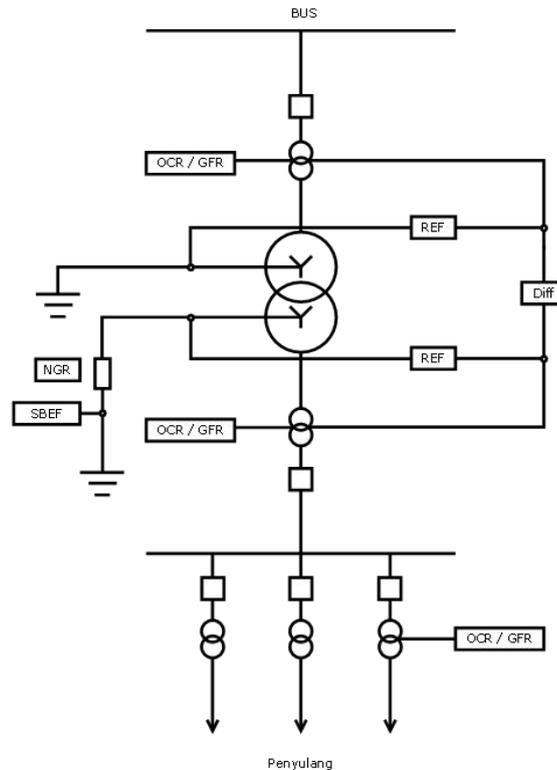
| | | | | | | |
|--------------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1. | Rele suhu minyak | 1 buah |
| 2. | Rele suhu belitan sisi primer | 1 buah |
| 3. | Rele suhu belitan sisi sekunder | - | 1 buah | 1 buah | 1 buah | 1 buah |
| 4. | Rele Bucholz tangki utama | 1 buah |
| 5. | Rele Tekanan Lebih tangki utama (<i>Sudden Pressure</i>) | 1 buah |
| 6. | Rele Tekanan Lebih OLTC (<i>Jansen</i>) | 1 buah |
| Proteksi Elektrik | | | | | | |
| 7. | Rele Diferensial | 1 buah | 1 buah | 2 buah | 1 buah | 1 buah |
| 8. | Rele Gangguan ke Tanah Terbatas (REF) sisi primer | | 1 buah | 2 buah | 1 buah | 1 buah |
| 9. | Rele Gangguan ke Tanah Terbatas (REF) sisi sekunder (untuk konfigurasi bintang) | - | 1 buah | 2 buah | 1 buah | 1 buah |
| 10. | Rele Arus Lebih (OCR) sisi primer | 2 fasa | 3 fasa | 3 fasa | 3 fasa | 3 fasa |
| 11. | Rele Arus Lebih (OCR) sisi sekunder | 2 fasa | 3 fasa | 3 fasa | 3 fasa | 3 fasa |
| 12. | Rele Arus Lebih (OCR) sisi tersier terbeban | 2 fasa | 3 fasa | 3 fasa | 3 fasa | 3 fasa |
| 13. | Rele Gangguan Tanah (GFR) sisi primer | 1 buah |
| 14. | Rele Gangguan Tanah | 1 buah |

| | | | | | | |
|-----|--|---------|---------|--------|--------|---------|
| | (GFR) sisi sekunder (hanya untuk konfigurasi bintang) | | | | | |
| 15. | Rele Gangguan Tanah (GFR) sisi tersier (tersier ditanahkan) | | | 1 buah | 1 buah | |
| 16. | Rele Pergeseran Tegangan Titik Netral / NDVR (tersier tidak ditanahkan) | | | 1 buah | 1 buah | |
| 17. | Rele Proteksi NGR (SBEF) (hanya untuk transformator belitan Y yang ditanahkan dengan resistor) | 1 buah* | 1 buah* | - | - | 1 buah* |

*) Diperlukan pada transformator belitan Y yang ditamahkan dengan resistor

(Sumber : PT. PLN (Persero), *Buku Pedoman Proteksi & Kontrol Trafo*, 2014, hal 2-3)

Proteksi transformator tenaga umumnya menggunakan rele diferensial dan rele *Restricted Earth Fault* (REF) sebagai proteksi utama. Sedangkan proteksi cadangan menggunakan rele arus lebih (OCR) rele gangguan ke tanah (GFR). Sedangkan *Standby Earth Fault* (SBEF) umumnya hanya dipergunakan pada transformator dengan belitan Y yang ditanahkan dengan resistor, dan fungsinya lebih mengamankan *Neutral Grounding Resistor* (NGR). Umumnya skema proteksi disesuaikan dengan kebutuhan.



Gambar 2.5 Skema Sistem Proteksi Transformator

A. Proteksi Mekanik

1. Rele Suhu (*Thermal*)

Suhu pada trafo yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, rugi-rugi pada trafo itu sendiri dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi akan mengakibatkan rusaknya isolasi kertas pada trafo. Untuk mengetahui suhu operasi dan indikasi ketidaknormalan suhu operasi pada trafo digunakan rele *thermal*. Rele *thermal* ini terdiri dari sensor suhu berupa *thermocouple*, pipa kapiler dan meter penunjukan.

2. Rele Bucholz

Pada saat trafo mengalami gangguan internal yang berdampak kepada suhu yang sangat tinggi dan pergerakan mekanis di dalam trafo, maka akan timbul tekanan aliran minyak yang besar dan pembentukan

gelembung gas yang mudah terbakar. Tekanan atau gelembung gas tersebut akan naik ke konservator melalui pipa penghubung dan rele bucholz. Tekanan minyak maupun gelembung gas ini akan dideteksi oleh rele bucholz sebagai indikasi telah terjadinya gangguan internal.

3. Rele *Sudden Pressure*

Rele *sudden pressure* ini didesain sebagai titik terlemah saat tekanan didalam trafo muncul akibat gangguan. Dengan menyediakan titik terlemah maka tekanan akan tersalurkan melalui rele dan tidak akan merusak bagian lainnya pada *main tank*.

4. Rele Jansen

Sama halnya seperti rele Bucholz yang memanfaatkan tekanan minyak dan gas yang terbentuk sebagai indikasi adanya ketidaknormalan/gangguan, hanya saja rele ini digunakan untuk memproteksi kompartemen OLTC. Rele ini juga dipasang pada pipa saluran yang menghubungkan kompartemen OLTC dengan konservator.⁶

B. Proteksi Elektrik

1. Rele Diferensial

Rele diferensial merupakan pengamanan utama transformator yang bekerja tanpa koordinasi dengan rele lain. Rele diferensial bekerja dengan prinsip mengukur perbedaan arus yang mengalir pada kedua ujung saluran yang diproteksi.

2. Rele *Restricted Earth Fault* (REF)

Merupakan salah satu proteksi utama transformator/reaktor yang prinsip kerjanya sama dengan rele diferensial, perbedaannya REF dipergunakan untuk pengamanan transformator terhadap gangguan fasa

⁶ PT. PLN (Persero), *Buku Pedoman Pemeliharaan Trafo Tenaga*, 2014, hal 14-16

– tanah, khususnya yang dekat dengan titik netral pada belitan bintang transformator. REF dipasang pada belitan transformator dengan konfigurasi Y yang ditanahkan.

REF terdiri dari 2 jenis, yaitu:

- a. REF jenis *low impedance*, parameter kerjanya adalah arus minimum.
- b. REF jenis *high impedance*, parameter kerjanya adalah tegangan minimum, ataupun arus minimum.

3. Rele Arus Lebih (OCR) dan Rele Gangguan Tanah (GFR)

Merupakan proteksi cadangan transformator/reaktor tetapi dapat menjadi proteksi utama pada proteksi kapasitor.

Parameter OCR dan GFR umumnya adalah:

- a. Nilai arus kerja minimum, merupakan setelan arus minimal yang akan mengerjakan rele.
- b. Nilai arus reset / drop off, merupakan besaran arus yang menyebabkan rele reset setelah mengalami pick up.
- c. Nilai arus kerja high set, merupakan setelan arus kerja high set untuk arus gangguan yang besar.
- d. Karakteristik waktu kerja, merupakan parameter pemilihan kurva waktu kerja.
- e. Nilai waktu kerja, merupakan setelan waktu kerja rele berdasarkan karakteristik yang telah ditentukan.

2.2.4 Gangguan pada Transformator Daya

Gangguan pada transformator daya tidak dapat dihindari, namun diharapkan dapat meminimalisir dampak dari meluasnya gangguan tersebut. Ada dua jenis penyebab gangguan pada transformator, yaitu gangguan eksternal dan gangguan internal.

1. Gangguan Internal

Gangguan internal merupakan gangguan yang berasal dari daerah pengamanan transformator, antara lain :

- a. Gangguan antar fasa pada belitan sehingga
- b. Gangguan fasa terhadap tanah pada belitan
- c. Gangguan pada inti transformator
- d. Gangguan pada *tap changer*
- e. Kebocoran *bushing* transformator
- f. Kebocoran minyak atau minyak trafo terkontaminasi
- g. Suhu lebih akibat beban lebih.

2. Gangguan Eksternal

Gangguan eksternal sumber gangguannya berasal dari luar pengamanan transformator, tetapi dampaknya dirasakan oleh transformator tersebut, diantaranya :

- a. Gangguan hubung singkat pada jaringan
- b. Beban lebih
- c. Sistem gangguan
- d. Frekuensi sistem turun
- e. Surja petir.²

2.3 Rele Proteksi

Rele Proteksi adalah susunan peralatan yang direncanakan untuk dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidaknormalan (anomali) pada peralatan atau bagian sistem tenaga listrik dan secara otomatis segera memberi perintah ke pemutus tenaga (PMT) untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem dan memberi isyarat berupa alarm dan *annunciator*.

Rele proteksi juga dapat merasakan adanya gangguan pada peralatan yang diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran yang diterimanya, misalnya arus, tegangan, daya, sudut fasa, frekuensi, impedansi dan sebagainya. Dengan besaran yang telah ditentukan, kemudian mengambil keputusan untuk seketika atau dengan perlambatan waktu membuka pemutus tenaga.

² Aslimeri, dkk., *Teknik Transmisi Tenaga Listrik Jilid 3*, 2008, hal 397-398.

2.3.1 Fungsi Rele Proteksi

Tugas rele proteksi berfungsi menunjukkan lokasi dan macam gangguannya. Dengan data tersebut memudahkan analisa dari gangguannya. Dalam beberapa hal rele hanya memberi tanda adanya gangguan atau kerusakan, jika dipandang gangguan atau kerusakan tersebut tidak membahayakan. Rele proteksi pada sistem tenaga listrik berfungsi untuk :

1. Merasakan, mengukur dan menentukan bagian sistem yang terganggu serta memisahkan secepatnya sehingga sistem lain yang tidak terganggu dapat beroperasi secara normal.
2. Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan yang terganggu.
3. Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian sistem yang lain yang tidak terganggu di dalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan.
4. Untuk dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi kepada konsumen, dan juga mutu listriknya baik.
5. Memperkecil bahaya bagi manusia.⁸

Maka dari itu, setiap rele yang dipasang atau diterapkan dalam sistem tenaga listrik harus dalam kondisi baik. Untuk menghindari rele tersebut dari kerusakan atau kegagalan harus dilakukan pemeliharaan dan pengujian ulang (rekomisioning) agar fungsi-fungsi yang telah disebutkan dapat tercapai.

2.3.2 Syarat - syarat Rele Proteksi

Rele proteksi dalam fungsinya sebagai pengaman memiliki beberapa syarat yang harus dipenuhi guna menjaga kandalan sistem tenaga listrik, yaitu :

1. Kepekaan (*sensitivity*)

Dalam mendeteksi gangguan di daerah pengamanannya, sebuah rele harus peka terhadap gangguan sekecil apapun.

⁸ Hazairin Samaulah, *Dasar - dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik* , hal 1-4.

2. Keandalan (*reability*)

Keandalan dapat diartikan sebagai kemampuan suatu rele saat bekerja dalam mengatasi gangguan di daerah yang diamankannya. Keandalan memiliki 3 (tiga) aspek, antara lain :

- a. *Dependability*, adalah kemampuan suatu sistem rele untuk beroperasi dengan baik dan benar. Pada prinsipnya pengaman harus dapat diandalkan bekerjanya (dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu), tidak boleh gagal bekerja. Dengan kata lain *dependability*-nya harus tinggi.
- b. *Security*, adalah tingkat kepastian suatu sistem rele untuk tidak salah dalam bekerja. Salah kerja, misalnya lokasi gangguan berada di luar pengamanannya, tetapi salah kerja mengakibatkan pemadaman yang seharusnya tidak perlu terjadi.
- c. *Availability*, adalah perbandingan antara waktu di mana pengaman dalam keadaan siap kerja (*actually in service*) dan waktu total operasinya.

3. Selektivitas (*selectivity*)

Maksudnya suatu rele harus dapat mengetahui letak dan jenis gangguan yang harus diamankan. Sehingga rele dapat menentukan kapan harus bekerja secara tepat sesuai penyetelan waktu maupun zona proteksinya.

4. Kecepatan

Diterapkannya rele proteksi bertujuan untuk mengisolasi gangguan secepat dan sesegera mungkin sebelum gangguan tersebut meluas dan membahayakan peralatan maupun manusia.

5. Stabilitas (*stability*)

Stabilitas rele proteksi dimaksudkan untuk menggambarkan kemampuan sistem proteksi untuk tetap konsisten pada karakteristik kerjanya dan hanya bekerja pada daerah proteksi yang telah ditentukan tanpa terpengaruh faktor di luar daerah proteksinya.

6. Ekonomis

Faktor ekonomi juga perlu dipertimbangkan sebab dengan semakin cepat suatu rele bekerja mengisolasi gangguan, maka semakin kecil kemungkinan kerusakan terjadi pada peralatan listrik. Hal tersebut dapat menekan biaya penggantian peralatan.

2.4 Rele Diferensial³

Rele diferensial digunakan sebagai proteksi utama (*main protection*) bagi transformator daya. Rele diferensial merupakan rele yang prinsip kerjanya berdasarkan Hukum Kirchoff dimana arus yang masuk pada suatu titik sama dengan arus yang keluar dari titik tersebut. Titik yang dimaksud merupakan daerah pengamanan rele diferensial yang dibatasi oleh dua buah transformator arus (CT). Dalam pengertian lain, rele diferensial membandingkan keseimbangan besaran arus masuk pada sisi primer dan sisi sekunder.

$$I_{diferensial} = I_d = \left| \vec{I}_p \right| + \left| \vec{I}_s \right| \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

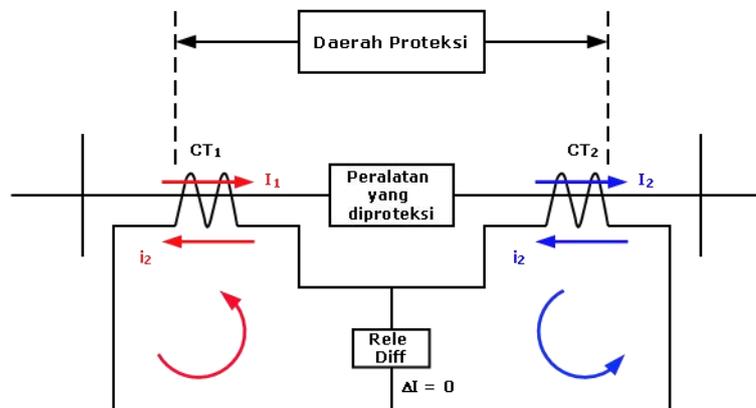
I_d = Arus diferensial (A)

I_p = Arus sisi primer (A)

I_s = Arus sisi sekunder (A)

Rele ini diharapkan dapat bekerja dengan sangat cepat dan selektif sehingga tidak diperlukan koordinasi dengan rele lain. Prinsip kerja rele diferensial ini bekerja pada tiga keadaan yaitu keadaan normal, keadaan gangguan di dalam daerah proteksi, dan keadaan gangguan di luar daerah proteksi.

³ Liem Ek Bien & Dita Helna, *Studi Penyetelan rele Diferensial Pada Transformator PT Chevron*, Jurnal, Volume 6, Nomor 2, Februari 2007, hal 43, ISSN 1412-0372.

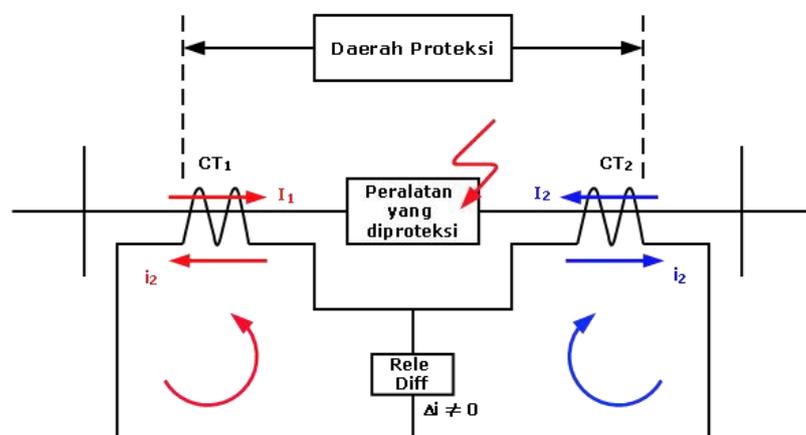


Gambar 2.6 Rele Diferensial dalam Keadaan Normal

Dalam keadaan normal, arus mengalir melalui peralatan yang diproteksi yaitu transformator daya, dan arus pada tranformator arus, yaitu I_1 dan I_2 . Jika rele diferensial dipasang antara CT_1 dan CT_2 , maka dalam kondisi normal tidak akan ada arus yang mengalir melaluinya dan rele tidak akan bekerja.

2.4.1 Gangguan di Dalam Daerah Proteksi

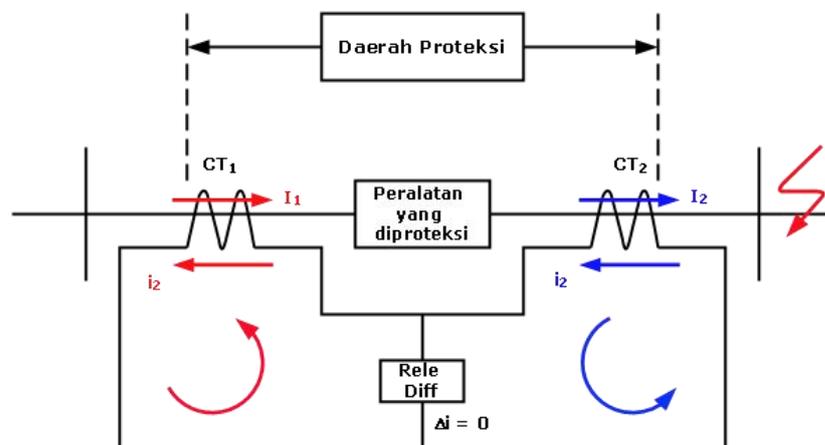
Rele diferensial harus bekerja sangat cepat dan selektif jika terjadi gangguan di dalam daerah pengamanannya atau daerah proteksi. Karena arus akan menuju titik gangguan di dalam daerah proteksi, maka akan terdapat selisih nilai arus ($\Delta I \neq 0$) sehingga rele bekerja.



Gambar 2.7 Rele Diferensial jika Terjadi Gangguan di Dalam Daerah Proteksi

2.4.2 Gangguan di Luar Daerah Proteksi

Pada saat sisi primer kedua CT dialiri arus I_1 dan I_2 , dengan adanya rasio CT_1 dan CT_2 yang sedemikian, maka besar arus yang mengalir pada sekunder CT_1 dan CT_2 yang menuju rele besarnya sama ($i_1 = i_2$) sehingga rele diferensial tidak bekerja, karena sirkulasi arus gangguan di luar daerah pengamanan kerja rele diferensial tidak mempengaruhi arus yang mengalir pada kedua CT yang terpasang pada peralatan yang diproteksi.



Gambar 2.8 Rele Diferensial jika Terjadi Gangguan di Luar Daerah Proteksi

2.4.3 Syarat Penyetelan Rele Diferensial

1. Trafo arus yang digunakan oleh rele diferensial ini harus memiliki rasio perbandingan CT_1 dan CT_2 sama, contohnya 200/5 dan 1500/5, sehingga $I_p = I_s$, serta sambungan dan polaritas CT_1 dan CT_2 sama. Polaritas trafo arus memperlihatkan arah arus yang masuk dan keluar dari trafo arus. Jika tidak, akan terjadi kesalahan dalam melihat arus yang masuk dan keluar melalui transformator tenaga. Hal ini, menyebabkan kesalahan dalam menentukan adanya gangguan di transformator tenaga.
2. Adanya pergeseran fasa akibat hubungan trafo tenaga yang terhubung delta (Δ) - (Y) maka untuk mengembalikan sudut fasa arus yang tergeser tersebut, hubungan trafo arus di buat berbeda

dan sudut pada CT di sisi primer dan CT di sisi sekunder trafo berbeda 180° . Hubungan CT di primer berbeda dengan CT di sekunder yaitu satu sisi terhubung Y, lainnya Δ . Yang terhubung Δ menghasilkan dan adanya arus magnetisasi dari transformator daya di sisi primer menyebabkan pergeseran fasa. Oleh karena itu diperlukan suatu CT tambahan atau *auxiliary* CT (ACT) yang terhubung Y, karena proteksi diferensial harus membandingkan arus pada dua sisi tanpa perbedaan fasa.

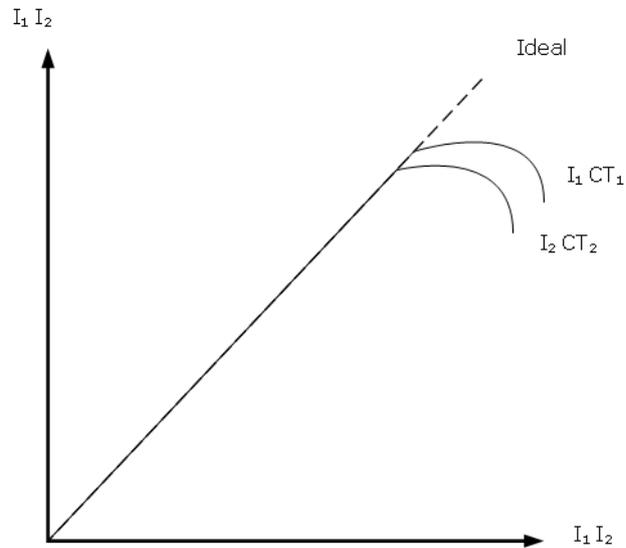
3. Karakteristik kejenuhan CT_1 dan CT_2 harus sama.³

2.4.4 Tinjauan Masalah pada Rele Diferensial

1. Karakteristik CT

Rele diferensial dalam operasinya bahwa dalam keadaan normal atau terjadi gangguan diluar daerah pengamanannya arus pada rele sama dengan nol. Karena itu kemungkinan salah kerja dari rele diferensiall dapat terjadi, arus yang dapat menyebabkan rele salah kerja tersebut dinamakan ketidakseimbangan arus (*unbalance current*). Bila suatu arus yang besar mengalir melalui suatu trafo arus maka arus pada sisi sekunder trafo arus tidak lagi linear terhadap arus primer. Hal ini disebabkan kejenuhan pada intinya. Pada rele diferensial trafo arusnya harus identik, namun kejenuhan intinya tidak dapat sama betul. Hal ini disebabkan perbedaan beban dari masing masing trafo arus tersebut.

³ *ibid.*, hal 48-49.



Gambar 2.9 Karakteristik Transformator Arus

2. Perubahan *On Load Tap Changer* Transformator Daya

Pada saat ini umumnya transformator sudah dilengkapi dengan *on load tap changer* dimana *tap* input dapat dirubah untuk mendapatkan output yang dikehendaki. Penyetelan dari trafo-trafo arus pada transformator daya telah diset pada tegangan nominal dari transformator daya tersebut. Dengan demikian bila terjadi gangguan pada waktu operasi transformator tersebut, maka tegangan pada sisi primernya harus diubah agar tegangan pada sisi sekundernya tetap. Hal tersebutlah yang menyebabkan terjadinya ketidakseimbangan arus yang dapat membuat rele salah kerja.

3. Adanya *Magnetizing Inrush Current* (Arus Serbu Magnetisasi)

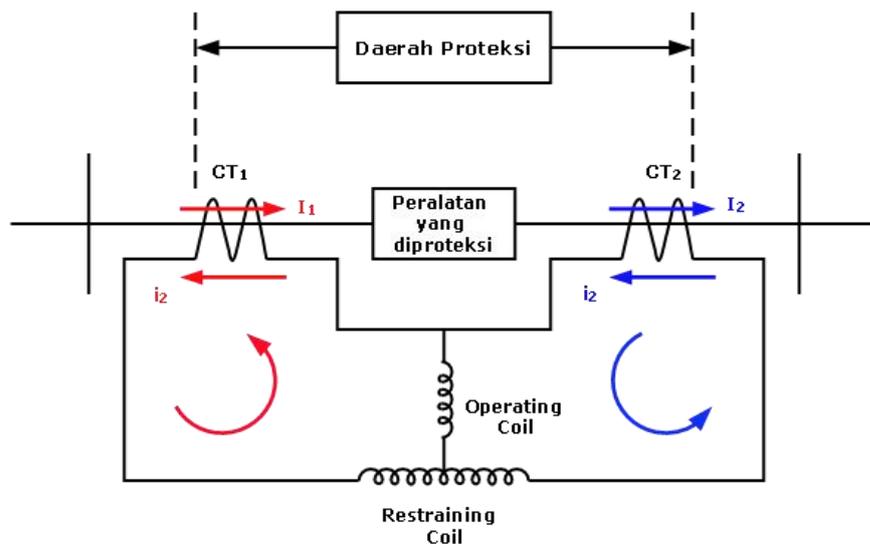
Jika trafo daya dihubungkan kesuatu sumber tenaga (jaringan) maka pada sisi primernya akan terjadi proses transient yaitu menaiknya arus yang dinamakan arus serbu magnetisasi (*Magnetizing Inrush Current*) yang besarnya dapat mencapai 8 sampai 30 kali dari arus beban penuh yang terjadi dalam waktu relatif cepat. Peristiwa ini

dapat membawa pengaruh terhadap kerja suatu rele meskipun pada daerah pengamanan tidak terjadi kesalahan

2.4.5 Karakteristik Rele Diferensial

Karakteristik rele diferensial dibuat sejalan dengan prinsip *Unbalance Current* (I_{μ}), untuk menghindari terjadinya kesalahan kerja. Kesalahan kerja disebabkan karena rasio CT *mismatch*, adanya pergeseran fasa. Selain itu, perubahan posisi *on load tap changer* (OLTC) pada transformator daya juga dapat mempengaruhi CT *mismatch*. Perbedaan kesalahan CT di daerah jenuh (saturasi CT) dan *inrush current* pada saat transformator *energize* juga menimbulkan *unbalances current* (I_{μ}) yang bersifat transient. Selain itu, pengaruh kesalahan (*error*) yang harus dikompensasi yaitu kesalahan sadapan (10%), kesalahan CT (10%), faktor keamanan (5%), *error mismatch* (4%), dan arus eksitasi (1%).⁷

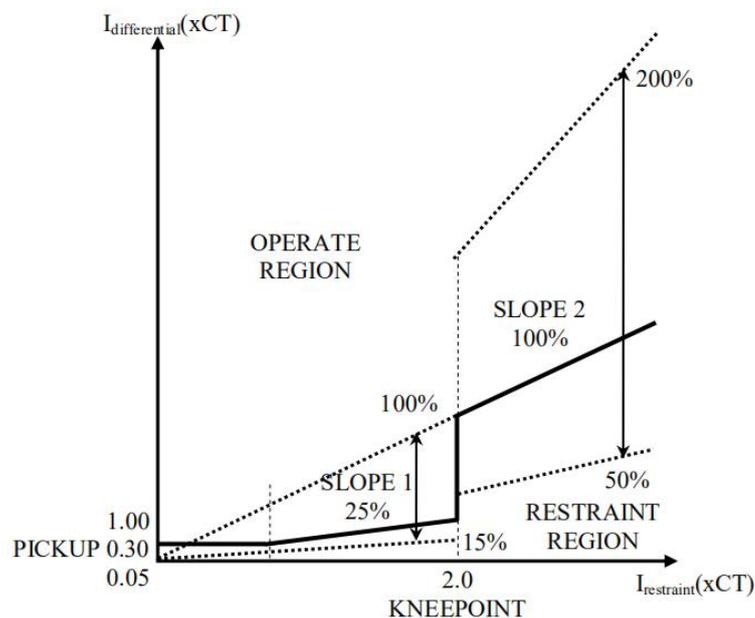
Untuk mengatasi masalah *unbalance current* (I_{μ}) pada rele diferensial caranya dengan menambahkan kumparan yang menahan bekerjanya rele di daerah I_{μ} . Kumparan ini di sebut *Restraining Coil*, sedangkan kumparan yang mengerjakan rele tersebut di sebut *Operating Coil*.



Gambar 2.10 *Restraining Coil* dan *Operating Coil*

⁷ PT. PLN (Persero) PUSDIKLAT, *Perhitungan Setting Relai Proteksi Gardu Induk*, 2009, hal 89.

Nilai arus penahan ($I_{restrain}$) dapat ditentukan dari arus maksimal yang mengalir sisi sekunder di CT_1 dan CT_2 . Slope didapat dengan membagi antara komponen arus diferensial dengan arus penahan. Slope 1 akan menentukan arus diferensial dan arus penahan pada saat kondisi normal dan memastikan sensitivitas rele pada saat gangguan internal dengan arus gangguan yang kecil. Sedangkan Slope 2 berguna supaya rele tidak kerja oleh gangguan eksternal yang berarus sangat besar sehingga salah satu CT mengalami saturasi.



Gambar 2.11 Kurva Karakteristik Rele Diferensial

2.5 Teori Perhitungan Penyetelan Rele Diferensial⁴

2.5.1 Perhitungan Rasio CT Ideal

Dalam penerapan rele diferensial maka harus ditentukan rasio CT dengan cara menghitung arus *rating*. Arus nominal atau I_N digunakan dalam menentukan arus *rating*. CT ratio untuk rele diferensial yang dipilih sebaiknya memiliki nilai yang mendekati nilai I_{rating} . (Sukmawidjaja, 1995: 3-115)

⁴ Primawati, Era. 2019. *Analisa Pengaturan Proteksi Rele Diferensial Pada Trafo III 60 MVA Di Gardu Induk Banyudono 150kv/22kv*. Naskah Publikasi. Universitas Muhammadiyah Surakarta.

Untuk menentukan arus nominal pada kedua sisi tegangan yaitu menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$I_N = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \dots\dots\dots (2.3)$$

Transformator dapat menarik beban lebih hingga 110% dari kapasitasnya, selama temperatur belitan di bawah temperatur maksimumnya, sehingga persamaan mencari arus *rating* adalah :

$$I_r = 110\% \times I_N \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

I_N = Arus nominal (A)

I_r = Arus *rating* (A)

S = Daya tersalur (MVA)

V = Sisi tegangan pada transformator (kV)

2.5.2 Perhitungan *Error Mismatch*

Error mismatch dihitung dengan tujuan untuk mengetahui kesalahan dalam membaca perbedaan arus di sisi primer dan sisi sekunder transformator daya dan pergeseran arus di trafo arus. Nilai *error mismatch* harus lebih kecil dari 5 % agar proteksi rele diferensial lebih optimal dalam mengamankan transformator daya. Perhitungan *error mismatch* didapat dari persamaan :

$$\frac{\text{Rasio CT ideal}}{\text{Rasio CT terpasang}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana :

V_1 = Tegangan sisi primer pada transformator (kV)

V_2 = Tegangan sisi sekunder pada transformator (kV)

2.5.3 Perhitungan Arus Sekunder CT

Sebelum menentukan nilai arus diferensial, arus yang mengalir pada

sisi sekunder CT harus diketahui dengan persamaan :

$$I_{\text{sekunder}} = \frac{1}{\text{Ratio CT}} \times I_N \dots\dots\dots (2.6)$$

2.5.4 Perhitungan Arus Diferensial

Arus diferensial merupakan selisih arus sekunder yang mengalir pada trafo arus pada sisi tegangan tinggi (CT₁) dengan arus sekunder yang mengalir pada trafo arus sisi tegangan rendah (CT₂).

$$I_{\text{diff}} = I_2 - I_1 \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

I_{diff} = Arus diferensial (A)

I_1 = Arus sekunder CT₁ (A)

I_2 = Arus sekunder CT₂ (A)

2.5.5 Perhitungan Arus *Restrain*

Arus *restrain* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan :

$$I_{\text{restrain}} = \frac{I_1 + I_2}{2} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana :

I_{restrain} = Arus penahan (A)

I_1 = Arus sekunder CT₁ (A)

I_2 = Arus sekunder CT₂ (A)

2.5.6 Perhitungan *Slope*

Slope didapatkan dari hasil bagi arus diferensial dengan arus *restrain*. Nilai *Slope* 1 digunakan untuk menentukan arus diferensial dan arus *restrain*

pada kondisi normal dan menentukan sensitivitas rele sehingga memastikan rele bekerja saat ada gangguan internal dengan arus gangguan kecil sekalipun. Untuk *Slope 2* berfungsi agar rele tidak bekerja saat terjadi gangguan eksternal dengan arus gangguan besar sekalipun. Persamaan untuk menghitung *slope* adalah :

$$Slope_1 = \frac{I_{diff}}{I_{restrain}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.9)$$

$$Slope_2 = \left(\frac{I_{diff}}{I_{restrain}} \times 2 \right) \times 100\% \dots\dots\dots(2.10)$$

2.5.7 Perhitungan Arus Setting

Setelah mendapatkan perhitungan di atas barulah nilai arus *setting* rele dapat ditentukan, dengan persamaan :

$$I_{set} = \%Slope_1 \times I_{restrain} \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana :

I_{set} = Arus *setting* (A)

$\%Slope_1$ = *Setting* kecuraman (%)

$I_{restrain}$ = Arus penahan (A)

2.5.8 Perhitungan Gangguan pada Transformator Daya¹

Data arus gangguan yang dimiliki dapat digunakan sebagai referensi untuk menghitung gangguan pada transformator daya yang terbaca pada rele di sisi tegangan 20 kV. Berikut persamaan dari perhitungan gangguan pada transformator daya :

$$I_{sekunder} CT = \frac{I_r}{Ratio CT_2} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$I_{sekunder} ACT = \frac{I_{sekunder} CT}{I_2} \dots\dots\dots(2.13)$$

$$I_{diff} = I_{sekunder} ACT - I_1 \dots\dots\dots(2.14)$$

Kemudian untuk menghitung batas arus gangguan yang diperbolehkan mengalir adalah dengan perhitungan berikut :

$$I_{\text{sekunder ACT}} = I_{\text{diff}} + I_1 \dots\dots\dots (2.15)$$

$$I_{\text{sekunder CT}} = I_{\text{sekunder ACT}} \times I_2 \dots\dots\dots (2.16)$$

$$I_N = I_{\text{sekunder CT}} \times \text{Ratio CT}_2 \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana :

- I_{diff} = Arus diferensial (A)
- $I_{\text{sekunder CT}}$ = Arus saat rele mulai bekerja pada sisi 20 kV (A)
- $I_{\text{sekunder ACT}}$ = Arus yang terbaca pada rele (A)
- I_1 = Arus sekunder CT₁ (A)
- I_2 = Arus sekunder CT₂ (A)
- I_N = Batas arus gangguan yang mengalir (A)

2.6 ETAP (*Electric Transient Analysis Program*)

ETAP merupakan suatu perangkat lunak (*software*) yang mendukung analisa sistem tenaga listrik. Perangkat ini dapat dioperasikan dalam keadaan *offline* untuk analisa dan simulasi tenaga listrik, *online* untuk pengelolaan data *real-time* atau digunakan untuk pengontrolan sistem secara *real-time*.

ETAP dapat digunakan untuk membuat proyek sistem tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis (*single line diagram*) dan jalur sistem pentanahan untuk berbagai bentuk analisis, antara lain: ailiran daya, hubung singkat, starting motor, *transient stability*, koordinasi rele proteksi dan sistem harmonisasi.

Hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja dengan ETAP antara lain :

- a. *One line diagram / Single line diagram*
- b. *Library*, informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektris maupun mekanis dari peralatan yang detail/lengkap

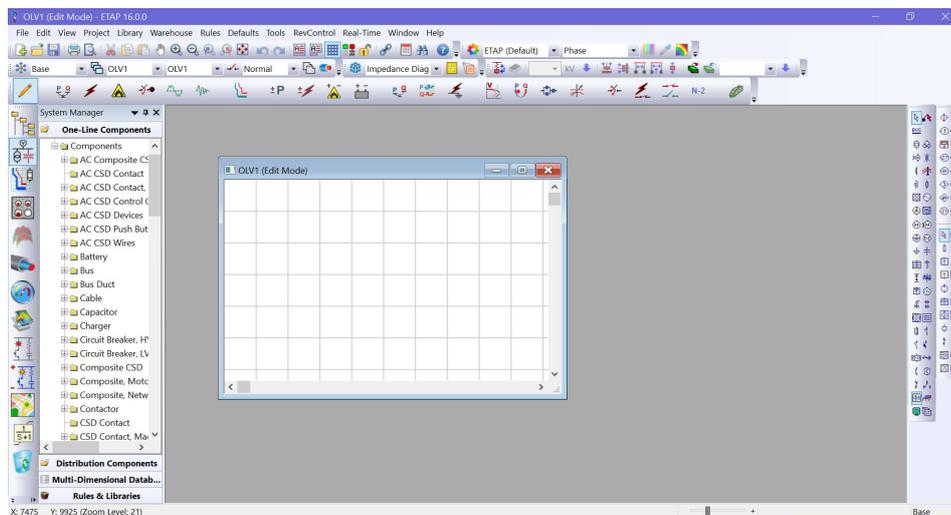
¹ Muhammad Arfianda. 2019. *Analisa Penggunaan Rele Diferensial Sebagai Proteksi pada Transformator Daya Gardu Induk Paya Pasir PT. PLN (Persero)*. Naskah Publikasi. Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi/analisa.

- c. Standar yang dipakai, biasanya mengacu pada standar IEC atau ANSI. Kedua standar ini memiliki perbedaan pada nilai frekuensinya. Nilai frekuensi untuk standar IEC adalah 50 Hz sedangkan untuk standar ANSI adalah 60 Hz. Hal tersebut juga berpengaruh terhadap spesifikasi peralatan yang akan digunakan.
- d. *Study Case*, berisikan parameter – parameter yang berhubungan dengan metode studi yang akan dilakukan dan format hasil analisa.

Pada penggunaan ETAP untuk proyek sistem tenaga listrik terdapat elemen-elemen rangkaian yang dapat diedit langsung dari diagram satu garis dan atau jalur sistem pentanahan. Untuk kemudahan hasil perhitungan analisis dapat ditampilkan pada diagram satu garis.

Berikut ini merupakan tampilan *interface* dan elemen-elemen dasar dari program ETAP versi 16.0 yang akan digunakan :



Gambar 2.12 Tampilan *Interface* ETAP 16.0

Berikut ini merupakan penjelasan mengenai elemen-elemen dasar yang terdapat di tampilan antarmuka ETAP 16.0 tersebut :

1. *Menu Bar*, digunakan untuk menjalankan fungsi utama, seperti pencetakan, penyimpanan, pengaturan halaman, pengaturan *library*, pengaturan standar operasi, dan lain-lain.

File Edit View Project Library Rules Defaults Tools RevControl Real-Time Window Help

Gambar 2.13 Menu Bar

2. *Project Toolbar*, digunakan untuk menjalankan fungsi pada proyek yang dibuat pada program ETAP.



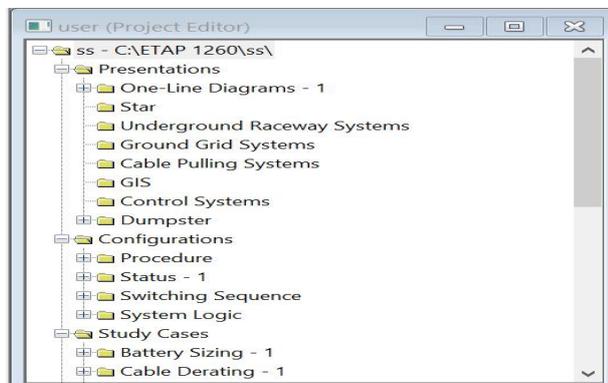
Gambar 2.14 Project Toolbar

3. *Select Mode*, Digunakan untuk memilih mode simulasi yang akan dilakukan terhadap jaringan, dari yang paling kiri ke kanan, fungsinya adalah sebagai *Editor*, *Load Flow Analysis*, *Short-circuit Analysis*, *Motor Acceleration Analysis*, *Harmonic Analysis*, *Transient Stability Analysis*, *Protective Device Coordination*, *DC Load Flow Analysis*, *DC Short-circuit Analysis*, *Battery Discharge Sizing*, *Unbalanced Load Flow Analysis*, *Optimal Power Flow Analysis*, *Reability Assesment*, *Optimal Capacitor Placement*, dan *Switching Sequence Management*.



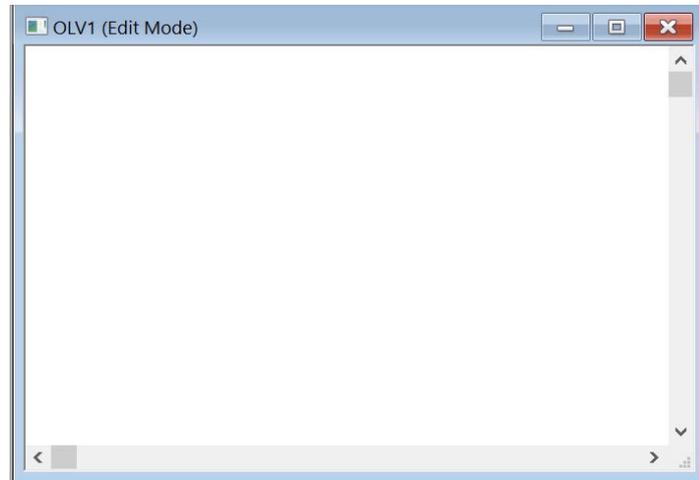
Gambar 2.15 Select Mode

4. *Project View*, digunakan untuk operasi dasar seperti pengeditan *library*. Tampilan elemen ini dapat diperbesar ataupun diperkecil.



Gambar 2.16 Project View

5. *One-Line Diagram*, digunakan untuk operasi dasar pengeditan rangkaian yang akan dianalisis maupun simulasi. Tampilan untuk elemen ini dapat diperbesar.



Gambar 2.17 *One-Line Diagram*

6. *Edit Toolbar*, terdiri dari elemen-elemen yang digunakan untuk membuat maupun mengedit suatu proyek tenaga listrik pada program ETAP.



Gambar 2.18 *Edit Toolbar*

Berikut elemen-elemen yang terdapat di menu *Edit Toolbar* beserta tampilannya :

- a. *Instrumen*, digunakan untuk menambahkan instrument bantu seperti CT, rele, alat ukur, dan lain-lain.



Gambar 2.19 *Instrument*

- b. *AC Element*, digunakan untuk menambahkan komponen AC pada rangkaian atau jaringan yang kita buat.



Gambar 2.20 *AC Element*

- c. DC *Element*, digunakan untuk menambahkan komponen DC pada rangkaian atau jaringan yang kita buat.



Gambar 2.21 DC *Element*